

## 心拍変動増大に最適な呼吸は圧反射感度を高めるか？ (第2報)

—LF成分のピーク周波数にもとづいたペース呼吸の効果—

榊原 雅人\*<sup>1)</sup> 金田 宗久\*<sup>2)</sup> 石田 光男\*<sup>1)</sup>

心拍変動 (HRV) バイオフィードバックは共鳴周波数をもとにしたペース呼吸を介して心臓血管系の圧反射機能を刺激する (Lehrer et al, 2003)。HRV の低周波変動 (LF) は圧反射機能に関連すると考えられるため (Berntson et al, 1997)、LF のスペクトルピークは共鳴周波数と同様の有用性をもたらすことができるかもしれない。本研究は LF スペクトルピーク周波数で行うペース呼吸が共鳴周波数をもとにしたペースと同様に圧受容体反射感度を増加させるかどうか検討することを目的とした。健康な大学生 (N = 12) がこの研究に参加し、心電図、呼吸および連続血圧 (BP) データを測定した。すべての参加者は、LF スペクトルピーク周波数で実施するペース呼吸 (LF 条件) と共鳴周波数によるペース呼吸 (Resonance 条件) を7日の間で各々をランダムな順に経験した。両日とも5分間のベースライン測定の後、各呼吸条件を5分間実施した。結果として、圧受容体反射感度 (ms/mmHg) は両方の条件で有意に増加したが、条件と測定期間 (ベースライン・呼吸) との間に有意な交互作用は明らかでなかった。LF 振幅 (ms) もペース呼吸によって有意に増加したが、条件と測定期間の交互作用は有意ではなかった。これらの結果は、HRV バイオフィードバック訓練におけるペース呼吸に HRV LF スペクトルピークはガイド周波数として使用できることを示唆している。今後、より大きなサンプルサイズで検討を継続する予定である。

キーワード：圧受容体反射感度、シーケンス法、心拍変動、自律神経活動、バイオフィードバック

### 1. はじめに

緩徐なペース呼吸とバイオフィードバックの手続きを用いて心拍変動 (heart rate variability) を増大させる方法を心拍変動バイオフィードバック (heart rate variability biofeedback: HRVBF) とよぶ。これまで喘息、心疾患、線維筋痛症、PTSD などストレスに関わるさまざまな症状に HRVBF が適用され<sup>1)</sup>、特に、抑うつ<sup>2)</sup>、不安の軽減<sup>3)</sup>、不眠の改善<sup>4-5)</sup>などに有用であることが知られている。HRVBF の効果の機序のひとつとして、この技法が圧受容体反射 (baroreflex: BR) に関わる自律神経機能を高めるように働く可能性のあることが指摘されている<sup>1)</sup>。BR とは、大動脈弓や頸動脈洞にある伸展受容体が血圧の変化を感知して孤束核にその情報を送り、自律神経を

介して心拍数や血管運動を調節する働きを指す。血圧コントロールに関わる代表的なホメオスタシス機能である。Lehrer et al.<sup>6)</sup> は継続的な HRVBF の練習によって心拍変動が増大し、このとき圧受容体反射感度 (BR sensitivity: BRS) が高まることを報告している。すなわち、緩徐なペース呼吸を実施する HRVBF の訓練によって BR 機能が継続的に刺激され、ホメオスタシスが向上する可能性のあることが示唆されている。

HRVBF では心拍変動の増大を効率よく引き起こすために、最適なペースで呼吸をコントロールすることが重視されている<sup>7)</sup>。これについて呼吸、心拍数 (心拍変動)、血圧の関係からその機序を示す。図1にみられるように、心拍変動は呼吸活動に強く影響を受けており、息を吸うと心拍数が上昇し吐くと心拍数が低下する。このような呼吸と心拍の連動は呼吸性洞性不整脈 (respiratory sinus arrhythmia: RSA) として知

\* 1) 愛知学院大学心身科学部心理学科

\* 2) 心身科学研究科心理学専攻・研究員

(連絡先) 〒470-0195 愛知県日進市岩崎町阿良池12 愛知学院大学心身科学部心理学科 E-mail: msakaki@md.ccnw.ne.jp

られている。一方、血圧にはもともと約10秒周期の変動 (Mayer wave) が存在し<sup>8)</sup>、意識的に呼吸周期を10秒程度に整えると、呼吸によって生じる心拍変動 (すなわち RSA) が血圧と共変するようになる。この際、吸気に伴って心拍数が上昇するとそれを受けて血圧は徐々に上昇するが、血圧の反応には5秒程度の遅延があり<sup>9)</sup>、完全に血圧が上がりきるタイミングでは呼気と重なることから、心拍変動と血圧の位相関係は理論的に180°となることが指摘されている<sup>1)</sup>。約10秒周期のペース呼吸についてこれらの関係を詳細にみると、息を吐いたときには”呼気に伴う心拍数の低下”と上述の”BR”によって心拍数を低下させようとする働き”が重なり合うことになり、心拍の減速方向への変化はより大きなものになると考えられる (吸気ではこれらと反対の作用が起こる)。したがって、約10秒のペース呼吸の下ではRSAとBRの作用が重なり合うことで心拍変動がより増大するといわれている<sup>1)</sup>。

このような状態を引き起こすのに適切な呼吸のペースを共鳴周波数 (resonance frequency) とよぶ<sup>7)</sup>。身長や性別などの要因から共鳴周波数には個人差があることが知られており<sup>1)</sup>、HRVBF 訓練の初期セッションにおいて個人の共鳴周波数を特定する手続きが採られている。そこでははじめに1分あたり6回のペース呼吸を実施して心拍変動の出現度合いを判断し、順次、6.5回、5.5回、5回、4.5回のペースについて同様に評価してゆく。この過程では個人に適切なペースで呼吸が行われたとき心拍変動が最も増大するので、当

該の呼吸ペースを共鳴周波数として特定し HRVBF 訓練のペース呼吸に利用する。しかしながら、この手続きにはいくつかの問題がある。ひとつは個人の共鳴周波数は6.5cpmのように区切りのよいポイントでなく本来は6.23cpmのように細かな値になり得る<sup>7)</sup>。もう一つは段階的にペース呼吸を行って共鳴周波数を同定するためこの手続きに一定の時間を要することである。心理療法セッションとして HRVBF を実施する場合には、より短時間で正確に共鳴周波数を特定できるよう配慮が必要となろう。

このような問題に対し、榊原・及川<sup>10)</sup>は、個人の共鳴周波数を効率的に同定するために、安静時心拍変動の低周波 (low frequency: LF) 成分のピーク周波数に着目した。彼らは、安静時 LF ピーク周波数をもとにペース呼吸を実施したとき、従来の共鳴周波数検索法によって同定された周波数のペース呼吸よりも大きな心拍変動が現れることを見出した。安静時の心拍変動にはちょうど0.1Hz 近傍に LF 成分のピークを観察することができるが、これは上述の BR に関わる血圧変動が心拍変動に現れたものであると考えられている<sup>11)</sup>。彼らはこの点に着目し、LF ピーク周波数をもとにしてペース呼吸を行うことで、心拍と血圧の共鳴が効果的に起こると仮定した。榊原・及川の知見ではこの仮説に沿うように心拍変動の増大がみられているが、一方で BRS も増加するかどうかについては明らかにされていない。そこで、本研究は安静時 LF 周波数をもとにしてペース呼吸を行ったとき、従来の共鳴周波数

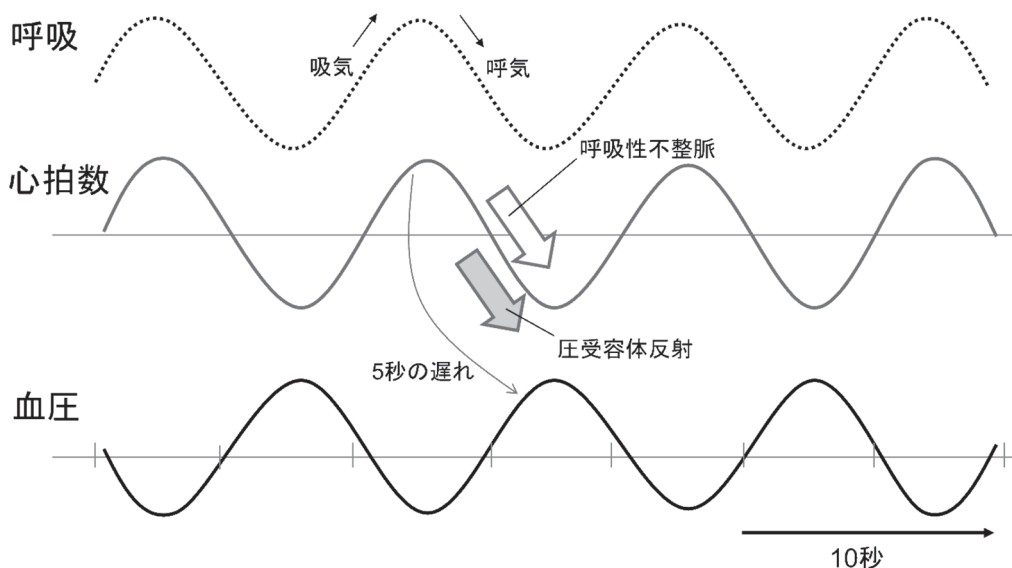


図1 10秒周期呼吸における心拍・血圧変動のモデル

検索法によって導かれたペース呼吸に比べて、心拍変動とともに BRS が効果的に増加するかどうか検討することを目的とした。先回の研究（第一報）<sup>12)</sup>では、連続血圧、心拍変動、呼吸の各パラメータを測定し、主に BRS の評価システムを構築した。今回はこの評価システムを用い健康な大学生を参加者において検討したので報告する。

## II. 方法

**実験参加者** 日常的に喫煙をしない健康な男女大学生 12 名（19～21 歳、女性 5 名）を対象として生理指標（連続血圧、心電図、呼吸）を測定した。実験にあたり、参加者に実験内容（研究の目的および内容、プライバシーの取り扱いなど）について説明し同意書を得た。なお、本研究は愛知学院大学心身科学部心理学研究倫理委員会の承認を受け、開示すべき利益相反はない。

**装置および測定** 動脈血圧波形は左手第 2・3 指に脈波測定センサを装着し非観血式連続血圧計（CNAP500, Cnsystem）にて測定した。校正血圧を得る目的で左上腕にカフを装着した。心電図は CM5 誘導によって時定数 0.1 秒で増幅記録した（BA1008, デジテックス研究所）。呼吸は伸縮ベルトを配置したストレンゲージを上腹部に装着して計測した（ストレンゲージ呼吸センサ, G1 システム）。これらの生体信号は AD 変換ボード（ATP-32F, Contec）を介して 1 kHz のサンプリング周期でパーソナルコンピュータ（Compaq nx6310, HP）に保存した。

**手続き** 防音シールド室にて各種センサを装着した後、座位で 10 分間の順応期間をおいた。すべての参加者は LF スペクトルピーク周波数でペース呼吸を行う条件（LF condition）と共鳴周波数で同じくペース呼吸を行う条件（Resonance condition）を約 1 週間の間隔をおいてランダムに実施した。両条件において、はじめに 5 分間の安静ベースライン期（Baseline）の測定を行った後、ペース呼吸期（Breathing）の測定を以下のように実施した。

**LF condition** LF スペクトルピーク周波数を決定するにあたり、自発的な呼吸が LF 帯域の心拍変動に影響することを避けるために、15 回/分（0.25 Hz）の呼吸統制を 5 分間実施した。ここでは参加者に眼前のコンピュータディスプレイに表示される呼吸ペースメーカーに吸気と呼気を合わせるよう指示した。ここで得られた心拍変動データに対して FFT によるスペ

クトル分析を施し、0.075 - 0.108 Hz（4.5 - 6.5 回/分）の範囲で最も優勢なピークを同定した。若干の休憩時間をおいた後、参加者にはここで決定した周波数で上下するペースメーカーをコンピュータ画面中央に呈示し、これに合わせてペース呼吸を行うよう指示した（5 分間）。

**Resonance condition** この条件では従来の HRVBF プロトコル<sup>7)</sup>に従って、各参加者の共鳴周波数を同定する手続きを実施した。すなわち、6、6.5、5.5、5、4.5 回/分の順でペース呼吸を実施した（2 分間）。各々のペース呼吸を行ったときの心拍変動データについて FFT によるスペクトル分析を施し、最も大きな LF パワーが出現したものについて当該参加者の共鳴周波数として決定した。その後、休憩をおいた後、共鳴周波数で上下するペースメーカーを上記と同様にコンピュータ画面中央に呈示し、このタイミングでペース呼吸を行うよう指示した（5 分間）。

**分析** 記録された心電図データから R 波を検出し、異常波の混入がないかどうか確かめながら RR 間隔を計測した。この際、RR 間隔の時系列データは水平補間によって 500 ミリ秒毎の等間隔データに変換した。各測定条件における心拍変動の大きさの比較には心拍変動データのスペクトル分析によって得られる低周波成分の振幅（LF amplitude）を用いた。上述の条件にしたがってペース呼吸を実施すると、当該の周波数をピークとした優勢なパワーが LF 周波数帯域に観察される。これはペース呼吸によって生ずる心拍変動増大の反映である。ここではデータの歪度を減ずる目的でパワーを振幅値に変換した。

一方、BRS は Parlow et al.<sup>13)</sup>の方法にしたがって spontaneous sequence 法によって評価した。はじめに測定された血圧および心電図データから、収縮期血圧と RR 間隔が共に連続して上昇あるいは下降する系列（3～7 拍）をコンピュータによって抽出した（生体情報収録・解析ソフトウェア Analog recorder pro BR, G1 システム）<sup>12)</sup>。この際、血圧値と RR 間隔の関係は、Parlow et al. と同様に圧反射の時間的な特徴（収縮期血圧の情報が迷走神経と舌因神経を介して中枢へ送られ RR 間隔が調節される過程）を考慮して、ある時点の血圧の発生からその次に起こる RR 間隔の組み合わせとして定義した。次に、各測定期間内の収縮期血圧と RR 間隔の値が同時に 3～7 連続して上昇する（または下降する）シーケンスを抽出した。これらのシーケンスについて回帰係数を求め平均したものを BRS (ms/mmHg) とした。この際、血圧は 1 mmHg

以上の変化をもって上昇（または下降）とし、収縮期血圧と RR 間隔の相関係数が0.85以上の場合のシーケンスを評価の対象とした<sup>14)</sup>。

統計的分析として、条件（LF condition・Resonance condition）×測定期間（Baseline・Breathing）の2要因分散分析を実施した。

### III. 結果

図2は LF condition と Resonance condition の BRS の変化を示している。分散分析の結果、測定期間に有意な主効果が認められた（測定期間： $F(1/11) = 39.241, p < .01$ , 偏 $\eta^2 = .781$ ）。いずれの条件も BRS は Baseline から Breathing にかけて著しい上昇をみせた。LF condition は Resonance condition に比べ

てやや上昇しているようにみえる。しかし、ここでは条件に有意傾向がみられたが（条件： $F(1/11) = 4.58, p < .1$ , 偏 $\eta^2 = .294$ ）、交互作用は有意でなかった。

次に、LF amplitude の変化を図3に示した。分散分析の結果、測定期間に有意な主効果が認められた（測定期間： $F(1/11) = 69.280, p < .01$ , 偏 $\eta^2 = .864$ ）。いずれのペース呼吸条件も Breathing では著しく上昇しているのがわかる。一方、条件および、条件と測定期間との間の交互作用は有意ではなかった。

表1には、RR 間隔の平均値である Mean RR、RR 間隔の標準偏差である SDNN、LF 周波数帯域の中心周波数 LF freq. を示している。分散分析の結果、Mean RR と SDNN の指標について測定期間に有意差が認められた（Mean RR:  $F(1/11) = 8.196, p < .05$ , 偏 $\eta^2 = .427$ ; SDNN:  $F(1/11) = 57.060, p < .01$ , 偏 $\eta^2 = .838$ ）。た

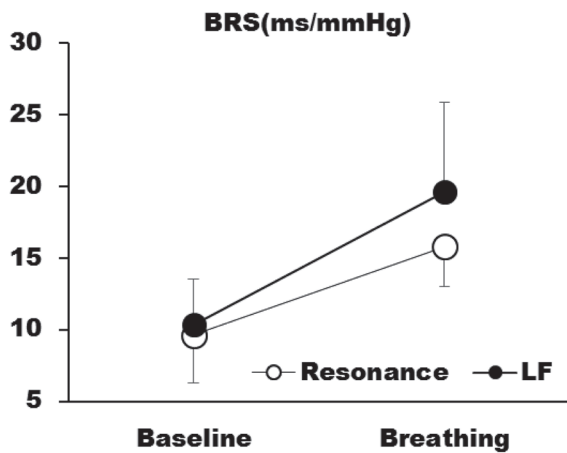


図2 LF condition と Resonance condition における圧受容体反射感度の変化

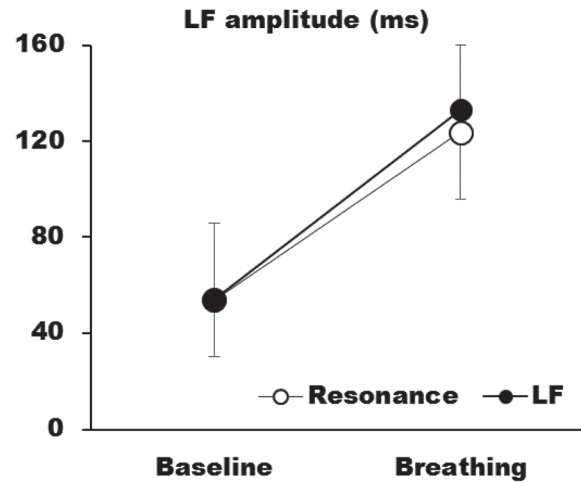


図3 LF condition と Resonance condition における LF 振幅の変化

表1 LF condition と Resonance condition における Mean RR、SDNN、LF 中心周波数の変化

	LF condition		Resonance condition	
	Baseline	Breathing	Baseline	Breathing
Mean RR (ms)	825 (115)	847 (101)	811 (78)	843 (88)
SDNN	65 (23)	106 (23)	59 (14)	100 (23)
LF frequency (Hz)	.086 (.029)	.098 (.011)	.088 (.029)	.097 (.009)

だし、これらの指標について条件、または条件と測定期間の交互作用は有意でなかった。

LF condition と Resonance condition のペース呼吸を行った際の LF frequency (Hz) については条件、測定期間およびそれらの交互作用に有意差はみられなかった。

#### IV. 考 察

本研究は、安静状態の LF 帯域のピーク周波数をもとにして行うペース呼吸 (LF condition) が共鳴周波数をもとにして行うペース呼吸 (Resonance condition) と同様の効果を発揮するかどうか検討するために BRS および心拍変動の各指標を比較した。

結果にみられたように、BRS は LF condition と Resonance condition において有意に増加した。この際、LF condition のそれは Resonance condition に比してやや増大したようにみえたが有意な変化ではなかった。このように共鳴周波数によるペース呼吸は BR を刺激し、その感度 (BRS) が増加したことは、Lehrer et al.<sup>9)</sup> の結果に一致する。また、今回、LF condition においても BRS の増大がみられ、このことは少なくとも安静時の LF ピーク周波数をもとにしたペース呼吸が BR を刺激する可能性のあることが示された。さらに、有意な変化ではなかったが、LF condition は Resonance condition よりも増大するようにみえたことから、安静時 LF ピーク周波数をもとにしたペース呼吸は BR をより効率的に刺激する可能性のあることも考えられる。今後、実験参加者数を増やして検討することで、この点を確認することができるかもしれない。

次に、LF amplitude は LF condition および Resonance condition において共に増大した。このことから、LF condition においても Resonance condition と同様の共鳴的効果が生じていることが示唆された。榎原・及川<sup>10)</sup> の結果では、LF ピーク周波数をもとにしたペース呼吸は共鳴周波数をもとにしたペース呼吸に比べて、心拍変動の低周波成分の振幅 (すなわち LF amplitude) が有意に増大することが示された。彼らの実験では、ペース呼吸のもととなる LF ピーク周波数の平均値は共鳴周波数のそれに比較して有意に低く、この点からペース呼吸を実施した際の心拍変動の程度が高まり、結果的に LF ピークをもとにしたペース呼吸において LF 振幅が増加したと考察されている。一方、本実験結果 (表 1) にみられたように、心拍変

動 LF ピーク周波数は LF condition は .098Hz (SD=.011)、Resonance condition は .097Hz (SD=.009) となり、これらの条件におけるペース (呼吸周波数) に実際的な差がみられなかったことから、LF amplitude の増大はいずれも同じ程度に留まったものと推測できる。

その他、RR 間隔の平均値を示す Mean RR はいずれのペース呼吸条件においても延長し (心拍数が低下し)、このような緩徐な呼吸のコントロールによって迷走神経活動が刺激されたものと考えられた。SDNN は RR 間隔の時系列データの標準偏差を示し、心拍変動の大きさを反映する指標である。Baseline から Breathing の測定においていずれの条件も有意に増大した。緩徐なペース呼吸によって心拍変動の LF 帯域にパワーが優勢に出現するようになると、相対的に高周波や超低周波領域のパワーの出現は少なくなることから、このような SDNN の増加は上述した LF amplitude の結果と同様の変化を示したものと考えられた。

以上、本実験では心拍変動の LF ピーク周波数をもとにしたペース呼吸が BR を刺激し、それは共鳴周波数をもとにしたペース呼吸に比べさらに効率的であると予想した。結果にみられたように、LF condition における BRS 値は顕著に増加したものの、一方で LF condition のペース呼吸と Resonance condition のペース呼吸の頻度に大きな差はみられなかったことから、両者の差異を観察するに至らなかった。今回の実験では、参加者が 12 名とやや少ないサンプルサイズであったこともこのような結果に関連していると考え、今後、さらに参加者数を増やしながらか引き続き検討する必要があると考えられた。

#### 付記

本報告に示したシーケンス法を用いた圧反射感度評価システムの構成は 2017 年度心身科学研究所研究助成の補助によるものである。また、システムに必要な連続血圧測定装置は科研費 16K04395 の補助を受けた。

#### 引用文献

- 1) Lehrer, P. (2007) . Biofeedback training to increase heart rate variability. In P. M. Lehrer, R. L. Woolfolk, & W. E. Sime (Eds.) , Principles and Practice of Stress Management (pp. 227-248) . New York: Guilford Press.
- 2) Karavidas, M. K., Lehrer, P.M., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Marin, H., Buyske, S., ...Hassett, A. (2007) . Preliminary

- results of an open label study of heart rate variability biofeedback for the treatment of major depression. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 32, 19–30.
- 3) 榑原雅人 (2011). 心拍変動バイオフィードバック法による不安軽減効果の可能性—特性不安の高い学生の訓練経過から—. 第39回日本バイオフィードバック学会学術総会.
  - 4) McLay, R. N., & Spira, J. L. (2009). Use of a portable biofeedback device to improve insomnia in a combat zone, a case report. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 34, 319–321.
  - 5) Ebben, M. R., Kurbatov, V., & Pollak, C. P. (2009). Moderating laboratory adaptation with the use of a heart-rate variability biofeedback device (StressEraser). *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 34, 245–249.
  - 6) Lehrer, P.M., Vaschillo, E., Vaschillo, B., Lu, S.E., Eckberg, D.L., Edelberg, R., …Hamer, R.M. (2003). Heart rate variability biofeedback increases baroreflex gain and peak expiratory flow. *Psychosomatic Medicine*, 65, 796–805.
  - 7) Lehrer, P., Vaschillo, B. Zucker, T., Graves, J., Katsamanis, M., Aviles, M., & Wamboldt, F. (2013). Protocol for Heart Rate Variability Biofeedback Training. *Biofeedback*, 41, 98–109.
  - 8) Julien, C. (2006). The enigma of Mayer waves: Facts and models. *Cardiovascular Research*, 70, 12–21.
  - 9) Madwed, J.B., Albrecht, P., Mark, R.G., & Cohen, R.J. (1989). Low-frequency oscillations in arterial pressure and heart rate, a simple computer model. *American Journal of Physiology, Heart and Circulatory Physiology*, 256, H1573–H1579.
  - 10) 榑原雅人・及川欧 (2017). 心拍変動バイオフィードバックにおける共鳴周波数検索について—安静時 LF ピーク周波数を利用した手続きの検討—. *バイオフィードバック研究*, 44, 21–28.
  - 11) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Heart rate variability, standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17, 354–381.
  - 12) 榑原雅人・金田宗久・石田光男 (2018). 心拍変動増大に最適な呼吸は圧反射感度を高めるか? (第1報)—シーケンス法を用いた圧反射感度評価システムによる検討—. *心身科学*, 10, 27–34.
  - 13) Parlow, J., Viale, J.P., Annat, G., Hughson, R., & Quintin, L. (1995). Spontaneous cardiac baroreflex in humans. Comparison with drug-induced responses. *Hypertension*, 25, 1058–1068.
  - 14) 奥田泰子・大槻毅・長尾光城 (2008). 心臓副交感神経系の

動脈圧受容器反射による上昇性および下降性の血圧調整機能は入浴時に増大する. *川崎医療福祉学会誌*, 18, 129–136.

(平成30年12月25日受理)

## Does suitable breathing for increasing heart rate variability enhance baroreflex sensitivity? (the 2nd report) : effect of paced breathing at peak frequency of LF component

Masahito SAKAKIBARA, Munehisa KANEDA, Mitsuo ISHIDA

### **Abstract**

Heart rate variability (HRV) biofeedback stimulates baroreflex function of the cardiovascular system through paced-breathing at resonance frequency (Lehrer et al., 2003). Spectral peak of low-frequency (LF) in HRV can provide efficacy of resonance frequency because the HRV LF is related to baroreflex function (Berntson et al., 1997). This study was designed to examine whether paced-breathing at the HRV LF spectral peak would increase baroreflex sensitivity (BRS) similar to the increase in BRS when paced-breathing at the resonance frequency. Healthy college students ( $N = 12$ ) participated in the study. ECG, respiration, and continuous blood pressure (BP) were collected. All participants were examined under paced breathing at the LF spectral peak frequency (LF condition) and paced breathing at the resonance frequency (Resonance condition) in a random order within 7 days. On both days, after a 5-min baseline, each of the breathing conditions was conducted (5-min). As a result, baroreflex sensitivity (ms/mmHg) increased significantly during breathing period in both conditions (time:  $p < .001$ ), although no significant interaction between condition and time was evident. LF amplitude (ms) also increased significantly during the breathing period in both conditions (time:  $p < .001$ ), although there was no significant effect of condition or its interaction with time. These results suggest that HRV LF spectral peak could be used as a guide frequency for paced-breathing in HRV biofeedback training. It is suggested that future research is undertaken using larger sample sizes.

Key words : Baroreflex sensitivity, spontaneous sequence method, heart rate variability, autonomic nervous activity, biofeedback